

De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. Una propuesta didáctica con base en la discusión de modelos.

Patricia E. Fernández¹ - Eduardo M. González² - Jordi Solbes Matarredona³

¹ Universidad Nacional de Rosario. ² Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

³ I.E.S. José Rodrigo Botet, Valencia, España.

patricia@fceia.unr.edu.ar, egonza@famaf.unc.edu.ar, Jordi.Solbes@uv.es

Se presenta una propuesta de una unidad didáctica cuyo objetivo es analizar la evolución de los modelos de la radiación, generar una visión más adecuada sobre la ciencia y la construcción del conocimiento científico que la que suele ser común en alumnos y profesores y construir un modelo de la radiación más cercano a la visión científica actual, en el que las propiedades del modelo corpuscular y el ondulatorio se conjugan en un nuevo objeto cuántico con comportamiento dual.

A través de cuatro actividades se analiza la secuencia de modelos propuestos a lo largo de la historia para explicar la naturaleza de la luz, desde el modelo corpuscular de Newton al ondulatorio de Huyghens y Young, culminando en la discusión del modelo de fotón propuesto por Einstein en su explicación del efecto fotoeléctrico.

Palabras clave: construcción de modelos, propuesta didáctica, efecto fotoeléctrico, fotón, modelos para la luz.

It is presented a didactic proposal with the aim to analyze the evolution of radiation models, create a more accurate vision of science and the construction of scientific knowledge than the one which is very common among teachers and students, and it pretends to construct a radiation model more related to nowadays' science, where the properties of the wave and particle models join to become a new quantum object with dual behavior.

It is analyzed the sequence of models proposed through history in four activities, to explain the nature of light, from Newton's particle model to Huygens and Young's wave model, ending in the discussion about Einstein's photon model and the photoelectric effect.

Keywords: model building, didactic proposal, photoelectric effect, photon, model of light.

Introducción

En 1905, Einstein ofreció una explicación del efecto fotoeléctrico, en un artículo notable que fuera publicado en el mismo volumen de los *Annalen der Physik* que sus otros conocidos artículos sobre relatividad especial y movimiento browniano.

En este artículo Einstein supone que la cuantización de energía propuesta por Planck en el problema del cuerpo negro es una característica universal de la luz y que la energía luminosa se compone de cuantos discretos de energía hf , en lugar de estar distribuida en el

espacio por el que se propaga, como las ondas.

A cien años de esta presentación que diera el puntapié inicial a los desarrollos posteriores de la física cuántica, posibilitando los grandes avances tecnológicos del siglo XX, la enseñanza de la física en nuestras aulas aún no incluye en forma efectiva las discusiones sobre la naturaleza de la estructura de la materia y la radiación según la física actual.

Por otro lado, el propio desarrollo de la ciencia supone la modelización del mundo natural en vista a lograr una descripción ajustada de los fenómenos que se observan y la síntesis de las leyes que gobiernan el comporta-

miento de las observaciones en teorías, previamente consensuadas por la comunidad científica. Si bien los modelos y la modelización se consideran parte integral de la cultura científica, su importancia tampoco ha sido suficientemente proyectada en las aulas. El análisis e interpretación de situaciones a partir de modelos y principios no está debidamente incorporado a la formación docente (Fernández et al 1997, Islas y Pesa, 2003 y 2004) y no siempre los profesores están preparados para abordar estos contenidos procedimentales, a pesar de que algunos incluso han sido incluidos en los contenidos básicos comunes a partir de la Reforma Educativa Argentina.

En este artículo, proponemos una unidad didáctica cuyo objetivo es analizar la evolución de los modelos para la radiación a lo largo de la historia, con el propósito de generar una visión más adecuada sobre la ciencia y la construcción del conocimiento. La propuesta es fruto de uno de los aspectos tratados durante el trabajo de campo desarrollado en el marco de una tesis doctoral sobre dificultades en la enseñanza-aprendizaje de los conceptos y modelos de la mecánica cuántica en el nivel de profesores, que pretende, además, brindar herramientas para el diseño de alternativas didácticas para el desarrollo de esta temática en el nivel Polimodal.

En esta unidad didáctica, a partir de la discusión de los diferentes modelos planteados para la luz a lo largo de la historia, se propone presentar una visión más dinámica de la ciencia (Gil y Solbes, 1993) en la que se proponen modelos alternativos para explicar anomalías en las teorías y en la que el consenso alcanzado por la comunidad científica juega un rol importante. El efecto fotoeléctrico, en este contexto, se presenta como una experiencia crucial en la discusión de la naturaleza de la luz, a partir del cual Einstein propone el modelo del fotón. Se ha elegido, además, por ser una experiencia cuya presentación no ofrece grandes dificultades conceptuales y cuya génesis histórica puede interesar a los alumnos.

Presentamos aquí, una breve descripción de las actividades desarrolladas que involucran:

- la caracterización de las principales propiedades distintivas de los modelos corpuscular y ondulatorio en general
- el análisis de los argumentos esgrimidos en favor del modelo corpuscular newtoniano y del ondulatorio de Huyghens para la luz
- una propuesta más actual de un modelo para la radiación, a partir de una simulación del efecto fotoeléctrico.

Acompañamos la ficha de trabajo para cada actividad con comentarios y recomendaciones para el profesor.

Objetivo de la unidad didáctica

El objetivo de esta unidad didáctica es analizar el carácter provisorio de los modelos de la ciencia a partir de la evolución histórica de los modelos para la luz. Hacer predicciones desde los modelos corpuscular y ondulatorio y discutir sus alcances y limitaciones. Analizar el efecto fotoeléctrico y presentar un modelo de la radiación a partir de la discusión de la energía del fotón $E=hf$.

Diseño de la unidad didáctica

La unidad didáctica se estructura sobre la base de cuatro actividades elaboradas desde una perspectiva constructivista. Se pretende que los alumnos (alumnos de nivel polimodal y universitario básico o profesores en formación) discutan en grupo las diferentes cuestiones que se plantean, consensúen posturas epistemológicas a partir de la puesta en común de sus opiniones con el resto del curso y construyan en conjunto los conceptos, en particular, el concepto de fotón. Esta construcción lleva implícita, como anclaje conceptual, la discusión sobre cómo el modelo dual de la radiación, recupera aspectos particulares de los modelos clásicos de onda y de partícula, sobrepasa los límites de ambos, y supone la síntesis de propiedades clásicamente irreconciliables en un nuevo objeto cuántico.

Actividades

Actividad 1

La actividad 1 está diseñada para que los alumnos discutan grupalmente y expliciten las principales características de las ondas y las partículas. Las instancias en que se presenta la descripción básica de la mecánica de la partícula libre y el comportamiento de las ondas mecánicas son previas al tratamiento de esta unidad y se suponen desarrolladas en cursos anteriores. Esta actividad abre un espacio de reflexión para que afloren las concepciones iniciales de alumnos y se consensúen las propiedades que determinan las principales características del modelo corpuscular y el ondulatorio.

Actividad 1. LOS MODELOS DE ONDA Y DE PARTÍCULA

Confeccionar un paralelo o una tabla donde se enumeren las características propias de las partículas y de las ondas

Objetivo: Discutir las características distintivas del modelo de partícula y el modelo de onda

Tiempo estimado de ejecución: 2 hs

Comentarios/Sugerencias

- Introducir esta actividad pidiendo a los alumnos ejemplos de fenómenos en los que observe la propagación de una onda, o el movimiento de una o varias partículas. A partir de estas propuestas enumerar las características distintivas del modelo corpuscular y el ondulatorio. El profesor presenta luego la Actividad 1.
- Discutir en grupos criterios de diferenciación de ambos modelos, en base a las características observadas en los fenómenos comentados para favorecer la explicitación de concepciones erróneas y la construcción conceptual.
- En el caso en que la currícula de la institución no contemple el dictado de unidades sobre los fenómenos ondulatorios con anterioridad, puede dejarse abierta la discusión y sugerir a los alumnos ir completando la tabla a medida que se trabajan las actividades 2 a 4.

Cuestiones a resaltar:

- mientras una partícula puede ser localizada en un determinado lugar del espacio y en un cierto instante de tiempo, una onda se extiende en el medio en que se propaga abarcando una amplia región
- cuando dos o más partículas chocan, intercambian energía y momento (choques elásticos o inelásticos), por el contrario, pulsos de ondas que viajan en un mismo medio se superponen por unos instantes y continúan su trayectoria sin alterarse
- las ondas, en general, no suponen transporte de masa como las partículas, sólo transportan energía y momento a través del espacio en el que se propagan
- la velocidad de una onda está determinada por las características del medio de propagación, mientras que en un caso ideal (medios no viscosos), el medio no influye en la velocidad de las partículas
- ondas y partículas tienen comportamientos diferentes al enfrentar un obstáculo: mientras las partículas *chocan* en algún punto por ser localizables, las ondas se extienden en el espacio y se difractan, bordeando el obstáculo.

Actividad 2

La actividad 2 está diseñada para trabajar sobre un material de lectura extraído de los siguientes libros:

- Lectura 1: Asimov I., (1986). *Introducción a la ciencia. T.1 Ciencias Físicas*. Buenos Aires: Hyspamerica.
- Lectura 2: Einstein A.; Infeld L., (1986), *La evolución de la Física*. Barcelona: Salvat.

Esta actividad permite plantear una discusión epistemológica sobre la naturaleza de la ciencia, tendiente a superar concepciones sobre la evolución lineal de la misma. La disidencia entre las dos posturas epistemológicas planteadas para explicar los fenómenos luminosos, es una oportunidad para diferenciar cuáles son los aspectos característicos de un modelo ondulatorio, de los correspondientes a un modelo corpuscular, a la vez que permite

observar el proceso dialéctico de la construcción de la ciencia en el que diferentes modelos pugnan por imponerse en una época dada. (Campanario, 2004).

Actividad 2. MODELOS PARA LA LUZ

1. Dar ejemplos de fenómenos en que la luz se comporte como onda y donde se comporte como corpúsculo. Justificar desde cada modelo, según las lecturas.

2. Dar ejemplos de algún fenómeno que no pueda ser explicado en el modelo corpuscular para la luz.

3. ¿Por qué según la teoría corpuscular de Newton, la velocidad de la luz en el agua o el vidrio es mayor que en el aire?

4. ¿Puede el modelo ondulatorio explicar todos los fenómenos observados dentro de la física clásica con la luz? ¿Cuál fue la mayor dificultad con que tropezó este modelo para ser aceptado?

Objetivo: Analizar el surgimiento de los modelos clásicos para la luz (modelos corpuscular y ondulatorio) y los argumentos que los sustentan. Analizar fenómenos desde ambos modelos y discutir sus alcances y limitaciones. Explicitar cuestiones como el carácter provisorio de los modelos de la ciencia y la naturaleza dinámica de su desarrollo
Tiempo estimado de ejecución: 2 hs.

Comentarios/Sugerencias

En el caso de alumnos de nivel Polimodal se sugiere reducir el material a la lectura 2 y dedicar un tiempo extra a comentar dicha lectura en clase, ya que los alumnos no siempre leen previamente el material o no lo hacen en forma crítica.

Una síntesis de los aspectos fundamentales tratados en cada lectura se presenta en el ANEXO I

Cuestiones a resaltar

- las características del modelo ondulatorio y del modelo corpuscular según los personajes de las lecturas en relación con la actividad 1
- el modelo corpuscular de la luz explica todos los fenómenos ópticos observados en los tiempos de Newton: la propagación rectilínea de la luz, la reflexión, la refracción y

el color. Sin embargo este modelo tiene limitaciones o cuestiones no resueltas: la velocidad de la luz en cualquier medio material es mayor que en el aire (no se conserva el momento lineal) y existen tantas partículas de luz diferentes, como colores (cada color corresponde a un tipo diferente de partículas)

- la comunidad científica de la época se resistía a aceptar el modelo ondulatorio para la luz, dado que no habían sido observados fenómenos de difracción ni de interferencia. Las limitaciones experimentales impidieron poner en evidencia el carácter ondulatorio de la luz y fueron decisivas en la elección del modelo corpuscular.

Actividad 3

En esta actividad los alumnos observan diferentes manifestaciones de las ondas y discuten las condiciones que determinan los límites de validez del modelo ondulatorio. Si la currícula de la institución no incluye una unidad previa sobre *ondas mecánicas*, es una buena oportunidad para mostrar y discutir, al menos en forma cualitativa, los principales aspectos del comportamiento ondulatorio.

Actividad 3 OBSERVACIÓN DE FENÓMENOS ONDULATORIOS

Observar las diferentes manifestaciones del comportamiento ondulatorio y estimar, cuando sea posible, los factores que determinan que se observe, o no, dicho comportamiento.

Se observará:

1. Interferencia y difracción de ondas en el agua (cubeta de ondas) o propagación de un frente plano o difracción a través de una abertura o interferencia de frentes que atraviesan dos aberturas

2. Ondas estacionarias (ondas en una cuerda sujeta en un extremo 3. Batido (ondas sonoras)

4. Interferencia y difracción de luz (aberturas y obstáculos en el caso de la luz, redes de difracción

Objetivo: Visualizar los variados aspectos del comportamiento ondulatorio: fenómenos de difracción, interferencia, límites de validez del modelo, condiciones sobre los tamaños de las aberturas en relación con la longitud de onda, obstáculos.

Tiempo estimado de ejecución: 3 hs

Comentarios/Sugerencias

Material requerido en esta actividad:

- Equipo de cubeta de ondas. Objetivo específico: visualizar fenómenos de difracción, y establecer límites de validez del modelo ondulatorio cuando los tamaños de las aberturas u obstáculos aumentan con respecto a las longitudes de onda del frente incidente.
- Cuerda sujeta en sus extremos, oscilador en uno de los mismos (onda estacionaria). Objetivo específico: mostrar un comportamiento ondulatorio localizado en el espacio en el que no se evidencia propagación, discutir un caso clásico de cuantificación de las frecuencias.
- Diapasones de frecuencias cercanas, micrófono, computadora con interfase. Objetivo específico: discutir cómo la superposición de dos de frecuencias próximas, reduce la extensión espacial de una onda armónica.
- Ranuras delgadas, hilos, cabellos, pequeños orificios, gránulos de polvo, extendido de glóbulos rojos, redes de difracción varias, láser de Helio-Neón. Objetivo específico: visualizar máximos de interferencia y de difracción en función del número de líneas de una red de difracción, observar la variación de intensidad en función del tamaño de diferentes aberturas y obstáculos, y poner en evidencia el límite de validez del modelo ondulatorio en caso de aberturas/obstáculos extensos.

Si no fuera posible disponer de equipos similares, pueden diseñarse experiencias simples con material de bajo costo para visualizar las propiedades más significativas del modelo ondulatorio (ondas en cuerdas y resortes, cubetas de onda, pueden utilizarse diodos láser como los comercializados como punteros, las redes de difracción pueden reemplazarse por ranuras entre dos hojas de metal delgadas o mallas metálicas, pueden utilizarse obstáculos pequeños como los cabellos, granos de polvo, extendidos de glóbulos rojos, etc.).

Cuestiones a resaltar

* *Interferencia y difracción de ondas en el agua (cubeta de ondas):*

- cuando el tamaño de las aberturas u obstá-

culos es mucho mayor que las longitudes de onda del frente incidente, no se observa difracción ni interferencia (límite de validez del modelo ondulatorio). Un modelo de rayos también puede ser útil para la descripción en este caso. Vincular esta observación con las lecturas de la actividad 2

- el fenómeno ondulatorio se extiende en el plano de la cubeta (no se localiza en un único punto del espacio)
- en la interferencia las posiciones de máximos y mínimos, dependen de los tamaños de aberturas y longitudes de onda
- * *Ondas estacionarias (ondas en una cuerda sujeta en un extremo)*
- el comportamiento de la onda no es el de una onda estrictamente viajera, puede pensarse como localizado en el espacio: nodos y antinodos tienen posiciones fijas
- Este fenómeno puede interpretarse como la superposición de dos ondas que viajan en sentidos opuestos, con la misma frecuencia y amplitud
- variando la tensión de la cuerda se observan varios modos normales de vibración
- las frecuencias están preestablecidas o cuantificadas y no se observan oscilaciones de frecuencias intermedias entre las correspondientes a los modos normales de vibración para la onda estacionaria

* *Batido (ondas sonoras)*

- la superposición de dos ondas de frecuencias próximas resulta en la modulación en la amplitud de la onda sonora resultante (observación auditiva). (La observación visual del fenómeno dependerá de la disponibilidad de una interface que pueda representar la señal en una PC, o bien de la disponibilidad de una simulación que la sustituya)

* *Interferencia y difracción de luz (aberturas y obstáculos en el caso de la luz, redes de difracción)*

- el patrón de interferencia de la luz que se difracta al pasar por una abertura es similar al observado en la difracción por un obstáculo
- el tamaño de la abertura/obstáculo determina el ancho y separación de los máximos de difracción observados, así como su cantidad
- cuando las aberturas son muy grandes frente a la longitud de onda incidente, sólo se

observa un máximo central (la luz parece comportarse como un rayo o como una haz de partículas).

Actividad 4

En esta actividad los alumnos se enfrentan a un experimento simulado en el cual la luz presenta un comportamiento que contradice la hipótesis de su naturaleza ondulatoria: *el efecto fotoeléctrico*.

Se pretende que los alumnos hagan inferencias, discutan la participación de las variables en juego, determinen cuáles son las relevantes, inferan la relación entre la energía de arranque del electrón y la frecuencia de la radiación incidente. Es decir, se intenta que los estudiantes *construyan* un nuevo modelo de la radiación a partir de la contrastación de sus predicciones con los resultados obtenidos en la simulación.

La actividad está diseñada para ser desarrollada en dos clases. En la primera clase trabajan los alumnos en forma semiautónoma, se familiarizan con la simulación, obtienen los primeros resultados, discuten la relevancia de las variables en juego (actividad 4.1). En la segunda clase, se realiza la puesta en común y la discusión general y finalmente se cierra el tema con una actividad de síntesis (actividad 4.2).

Actividad 4.1

Objetivo: Cuestionar el modelo ondulatorio de la radiación a partir de los resultados obtenidos en la experiencia del efecto fotoeléctrico y analizar la potencialidad de algunos aspectos del modelo corpuscular para dar cuenta de los fenómenos observados. Construir un nuevo modelo corpuscular para la radiación a partir de una simulación del efecto fotoeléctrico. Presentar la constante de Planck y discutir su rol en la descripción del comportamiento de la radiación. Definir el concepto de fotón

Tiempo estimado de ejecución: 4 hs

La actividad 4.1 consiste en reproducir la experiencia del efecto fotoeléctrico a partir de una simulación en java y deducir una ley que describa la emisión de electrones a partir de la radiación incidente sobre un electrodo metálico.

Se diseñó para este propósito una página web basada en el material ofrecido por Angel Franco en el curso interactivo Física con Ordenador (original en: <http://www.sc.ehu.es/sb-web/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>), reformulando las consignas para darle un formato más abierto, dejando planteadas diversas preguntas que motivan en los asistentes la emisión de hipótesis, pero respetando el diseño experimental elaborado por Franco. La guía de la actividad incluye: una tabla de longitudes de onda emitidas por diferentes materiales conocidos con la intención de que los valores de trabajo no sean elegidos al azar sino que correspondan a valores de emisión observados experimentalmente, un desarrollo teórico-histórico y varios ejercicios finales en forma de preguntas. El material ofrecido por Franco permite realizar los cálculos y mediciones en la misma página web, sin embargo, es recomendable confeccionar las gráficas en papel y en la misma escala, para facilitar la comparación de resultados. Los alumnos reproducen la experiencia en la pantalla de la PC, eligen el material del electrodo, la longitud de la radiación incidente y el potencial de retardo y observan en un amperímetro la intensidad de la corriente que generan los electrones arrancados. La figura 1 muestra el applet que representa el dispositivo experimental y la figura 2, una de las gráficas que pueden obtenerse exportando los resultados de la simulación.

Comentarios/Sugerencias

La actividad 4.1 se presenta en la primera clase, los alumnos se familiarizan con la simulación y obtienen los primeros resultados trabajando en grupos, en forma semiautónoma, bajo la supervisión del profesor a cargo del curso.

Se sugiere en particular:

- tener en cuenta en la programación el tiempo necesario para la familiarización con el programa, antes de registrar resultados en la actividad.
- asignar diferentes metales (material de los electrodos) a cada grupo
- realizar las gráficas en la misma escala para poder comparar las pendientes.

La actividad culmina en la clase siguiente en la que, a partir de la discusión de los resultados obtenidos la clase anterior, los alumnos consensúan una ley que describe la emisión electrónica en un metal a partir de la frecuencia de la radiación incidente y discuten las consecuencias de las hipótesis realizadas durante la construcción de dicha ley.

Se sugiere pedir a los alumnos llevar copias de las gráficas para intercambiar con sus compañeros y a partir de la comparación de las mismas discutir una interpretación de la ordenada al origen y de la pendiente. Un retroproyector puede ser de gran utilidad para presentar transparencias con las gráficas obtenidas para distintos metales. El retroproyector permite además superponer las gráficas en igual escala y mostrar cómo la pendiente se mantiene constante para todos los metales. En caso de disponerse de un cañón de proyección, puede en un breve tiempo repetirse la experiencia en conjunto para algunos valores de interés particular. Una secuencia de valores posibles se muestra en el Anexo II. Por razones de extensión la guía de la actividad 4.1 no se incluye en esta presentación, pero puede solicitarse a los autores.

Advertencia: sugerimos conferir a la simulación un rol activo en la construcción del conocimiento, como instrumento que propicia el análisis de situaciones, el intercambio de ideas y el debate entre los estudiantes, superando un carácter simplemente operativo del uso de la misma (Utges et al 2003). Por otro lado, es importante prevenir a los docentes que decidan implementar esta u otra simulación con sus

alumnos, de la llamada ilusión de la interactividad, es decir, del error en el que se suele incurrir al creer que la sola interacción con el experimento simulado basta para que los alumnos arriben a los resultados esperados (Utges et.al 2004). Por el contrario, la construcción del conocimiento exige del profesor orientar las observaciones y generar, las condiciones necesarias para la reflexión y la elaboración de conceptos por parte de sus alumnos.

Cuestiones a resaltar/secuencia de trabajo

- en los casos en que se observa emisión: al aumentar la intensidad de la radiación incidente o disminuir el potencial de retardo, aumenta la corriente en el amperímetro, es decir, aumenta el número de electrones que circulan o bien su velocidad (el análisis de esta variación permitirá establecer un puente entre los modelos macroscópico ondulatorio y el corpuscular del fotón en la actividad 4.2)
- cuando no hay emisión, ésta no se consigue modificando los valores de la intensidad de la radiación ni el potencial de frenado. Para conseguir la emisión se debe cambiar adecuadamente el metal del electrodo, o bien, disminuir la longitud de onda
- en la situación en que los electrones apenas logran alcanzar el electrodo opuesto: el potencial de detención V_0 es una medida de la energía cinética máxima de los electrones arrancados (algunos electrones tendrán una energía menor debido a la pérdida que experimentan al atravesar el metal)
- la longitud de onda y el potencial de detención requerido en cada caso guardan una re-

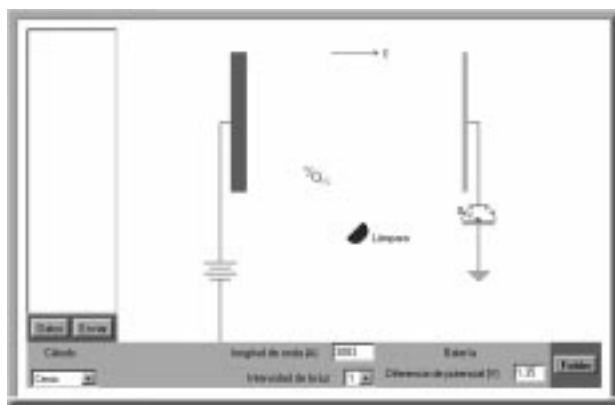


Figura 1.

Applet simulación del efecto fotoeléctrico: permite variar la intensidad de la radiación incidente, la longitud de onda y el potencial de retardo. Los valores de interés se registran a través del botón Datos y se exportan para ser graficados haciendo clic en Enviar.

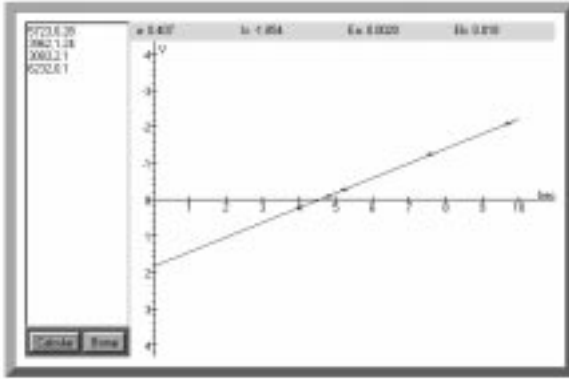


Figura 2.

La gráfica del potencial de retardo vs. la frecuencia de la radiación incidente es una recta $V_0 = mf + C$. Teniendo en cuenta que la energía del electrón saliente es

$eV_0 = E_{rad} - \phi_0$ la energía de la radiación resulta ser $E_{rad} = emf = hf$ donde h es la constante de Planck y puede calcularse a partir de la pendiente de la gráfica.

lación de proporcionalidad inversa por lo que es conveniente graficar el V_0 en función de la frecuencia. La gráfica resulta así una recta con pendiente m y ordenada al origen C , que puede escribirse:

$$V_0 = mf + C \quad (1)$$

- las gráficas para otros metales, (si están en la misma escala) tienen *todas* la misma pendiente “ m ”, pero difieren en la ordenada al origen “ C ” (visualizar esta propiedad superponiendo ya sea las copias de las gráficas en papel o las transparencias en el retroproyector). Se deduce, entonces, que la ordenada al origen depende del metal que constituye el electrodo y puede relacionarse con la energía de arranque mínima necesaria para cada material (función trabajo)
- la pendiente calculada a partir de las gráficas es una constante para todos los materiales y resulta $m = 4,12 \cdot 10^{-15} \text{ V.seg}$

Interpretación de los resultados

- la energía de la radiación se utiliza en parte para arrancar el electrón (ϕ_0) y en parte para entregarle energía cinética (eV_0):

$$E_{rad} = \phi_0 + eV_0$$

la energía del electrón, resulta, entonces:

$$eV_0 = E_{rad} - \phi_0 \quad (2)$$

donde ϕ_0 se denomina función trabajo

- multiplicando (1) por la carga del electrón e se obtiene la expresión (2) de la energía del electrón arrancado, de donde se deduce que la gráfica de la energía es también una recta
- la energía de la radiación incidente resulta entonces $E_{rad} = emf = hf$ donde h es la conocida *constante de Planck* y es la misma para to-

dos los materiales. Observación: h es la pendiente de la recta que resulta de la expresión (1) multiplicada por la carga del electrón e , y su valor calculado es $h = 6,59 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

- en el proceso de arrancar un electrón la energía de la radiación consiste en *paquetes de energía* hf , también llamados *fotones*, caracterizados por su frecuencia. (Esto puede relacionarse con la hipótesis de Planck para la explicación de la radiación de cuerpo negro)
- la ecuación (2) queda entonces: $eV_0 = hf - \phi_0$ llamada a veces ecuación de Einstein.

Actividad 4.2

La actividad 4.2 se implementa luego de la puesta en común de la actividad 4.1 y consiste en una actividad de cierre y consolidación a través de la resolución de cinco cuestiones en forma de preguntas. Para dar cuenta de esta actividad, los alumnos deben posicionarse alternativamente en los modelos planteados: el modelo de onda tratado en las actividades anteriores y el modelo corpuscular que da cuenta del efecto fotoeléctrico.

Actividad 4.2. CUESTIONES FINALES SOBRE EL MODELO DE RADIACIÓN

1. ¿Cómo se explica el resultado de que la corriente máxima sea proporcional a la intensidad en el modelo corpuscular de la luz?
2. ¿Qué características experimentales del efecto fotoeléctrico pueden explicarse mediante la física clásica? ¿Cuáles características no se explican?

3. La longitud de onda umbral para el potasio es de 558 nm. ¿Cuál es la función trabajo para el potasio? ¿Cuál es el potencial de detención cuando se utiliza una luz de longitud de onda de 400 nm?

4. Luz de longitud de onda de 400 nm e intensidad 10^{-2} W/m^2 incide sobre el potasio. Estimar el retraso de tiempo esperado clásicamente si la función trabajo para el potasio es 2,22 eV. (Considerar $r = 10^{-10} \text{ m}$ como un radio típico del átomo).

5. En el ejemplo anterior, ¿cuántos fotones inciden por segundo y por metro cuadrado?

Objetivo: posicionarse en el modelo ondulatorio o en el corpuscular para resolver diferentes cuestiones. Analizar cuál de estos modelos es el más apropiado en cada caso. Establecer cuando fuera posible, puentes entre los mismos.

Tiempo estimado de ejecución: 1 hora (contemplado dentro del tiempo total de la actividad 4).

Comentarios/Sugerencias:

Si los alumnos no han desarrollado una unidad de ondas con anterioridad, tendrán dificultades en responder algunas de estas cuestiones, en especial las cuestiones 4 y 5. En este caso, el profesor deberá hacer algunos comentarios analizando cualitativamente cada situación, profundizando la discusión en la medida en que el desarrollo de contenidos previo lo haga posible.

Cuestiones a resaltar

- diferenciar los conceptos de intensidad y potencia de la radiación. Un ejemplo útil es analizar la energía emitida por unidad de tiempo por una antena (potencia emitida) y cómo ésta se distribuye sobre una superficie cada vez mayor a medida que se propaga, disminuyendo la energía por unidad de área (intensidad)
- explicitar el modelo desde el cual se responde cada cuestión y las razones para ese posicionamiento
- establecer puentes entre ambos modelos a partir del cálculo de la energía total transportada por los fotones y la intensidad de la radiación en la cuestión 5

Consideraciones finales

El tratamiento de los modelos que la ciencia desarrolla para dar cuenta de los fenómenos observados, no siempre es encarado con la misma rigurosidad que el desarrollo de contenidos (Fernández et al, 1997).

El análisis del modelo dual para la radiación y la materia parece tener una potencialidad didáctica interesante en este sentido, no sólo para presentar un modelo más actual de la materia y la radiación, sino también, para introducir una visión más dinámica de la ciencia, en la que diferentes posturas epistemológicas pugnan por explicar el mundo natural. Una presentación de esta índole, con base en la discusión de modelos, resulta muy apropiada incluso para la introducción de los conceptos de física cuántica en el nivel Polimodal. Así, por ejemplo, partiendo de modelos clásicos más familiares como los de onda y de partícula, discutiendo sus limitaciones para explicar los nuevos fenómenos cuánticos y también las aportaciones de cada uno de ellos a la construcción de un nuevo modelo, prescindiendo en una primera instancia del formalismo específico pero cuidando de no incurrir en errores conceptuales ni epistemológicos (Solbes et al, 2001), se favorece la evolución de las concepciones hacia modelos de estructura de la materia más actuales.

Si bien en esta unidad didáctica sólo se presenta una discusión sobre los modelos para la radiación, es importante continuar el tratamiento considerando los aspectos ondulatorios manifestados en el comportamiento de las partículas atómicas, la difracción de electrones y su descripción desde el modelo de onda. La discusión de estos aspectos fueron objeto de otras unidades didácticas en el marco del desarrollo general del curso de física cuántica para profesores.

La discusión de modelos, sugiere un camino que facilita el tránsito de las concepciones clásicas hacia estructuras más abstractas y formales. Nuestra propuesta, se basa en estas ideas y pretende ser un aporte a la mejora de la enseñanza de estos temas en el nivel de profesorado y universitario básico, e incluso en el nivel Polimodal, previa adaptación de las discusiones al desarrollo cognitivo de los alumnos.

Referencias

- Campanario J. M. (2004), Científicos que cuestionan los paradigmas dominantes: Algunas implicaciones para la enseñanza de las ciencias. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 3 N° 3
- Fernández, P., González, E., Solbes, J. (1997). La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos. *Revista Educación en Ciencias* (Univ. de San Martín, Arg.). Vol 3.
- Gil, D , Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*. Vol 15, pp. 255-260.
- Islas S.M., Pesa M. (2004) Concepciones de los profesores sobre el rol de los modelos científicos en clases de física. *Revista de Enseñanza de la Física*. Vol 17 (1), pp.43-50.
- Islas, S. M., Pesa, M.(2003) ¿Qué. rol asignan los profesores de física de nivel medio a los modelos científicos y a las actividades de modelado? *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra, 57-66.
- Solbes J., Fernández,P. , González E. (2001). Carencias en la formación docente en temas de física contemporánea en argentina. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*. Número especial VI Congreso Internacional de Investigaciones en Enseñanza de las Ciencias. Barcelona. Vol II, p.407.
- Utges, G.; Fernández, P.; Jardón, A. (2003), Simulaciones En La Enseñanza De La Física.Nuevas Practicas, Nuevos Contenidos. Memorias REF XIII. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Utges, G.; Fernández, P.; Jardón, A. (2004). Incorporando simulaciones en las clases de la física. un estudio de caso enfocado en la perspectiva del profesor. Memorias SIEF VII, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

ANEXO I :
SÍNTESIS DE LAS LECTURAS DE LA ACTIVIDAD 1

Síntesis de la lectura 1: Asimov I., (1986). Introducción a la ciencia. T.I Ciencias Físicas. Buenos Aires: Hyspamerica

El texto seleccionado presenta una breve descripción del modelo corpuscular de Newton para la luz, el modelo ondulatorio propuesto por Huyghens, la confirmación de este modelo a partir de las observaciones de Fresnel y Franhoufer, la naturaleza ondulatoria electromagnética propuesta por Maxwell, plantea el problema de la existencia de un medio, el éter, para la transmisión de las ondas electromagnéticas versus la transmisión en el vacío y la acción a distancia.

Síntesis de la lectura 2: Einstein A.; Infeld L., (1986), La evolución de la Física. Barcelona: Salvat

Se presenta un extracto del libro de Galileo Diálogos sobre dos nuevas ciencias. A través de una conversación del maestro y sus alumnos sobre la velocidad de la luz se discuten argumentos a favor y en contra del modelo corpuscular y el ondulatorio.

Se muestra cómo el modelo corpuscular es suficientemente satisfactorio para la época de Newton al ser capaz de explicar la refracción y reflexión de la luz (propagación rectilínea, conservación del momento en la reflexión. Se presentan las primeras contradicciones: el enigma del color, el aumento de velocidad predicho por el modelo cuando la luz atraviesa un medio diferente del vacío

Según la teoría de Huyghens, la luz no es una sustancia como plantea Newton, sino una transferencia de energía en forma de onda. El texto también discute en forma de diálogo entre Newton y Huyghens, cómo la teoría ondulatoria de Huyghens explica todos los fenómenos ópticos explicados por la teoría corpuscular y plantea la ambigüedad que se desprende al existir dos teorías incompatibles para explicar un mismo fenómeno, decidiéndose en favor de una o de la otra. después de una cuidadosa consideración de los méritos y defectos de cada una.

Recuerda que en la época de Newton -e incluso más de cien años después- muchos físicos se inclinaron por la teoría corpuscular y sólo a mitad del siglo XIX la historia dio su veredicto en favor de la teoría ondulatoria de la luz. En su conversación con Huyghens, Newton expresa que en principio existe la posibilidad de una decisión experimental entre las dos teorías ya que la teoría corpuscular implica la existencia de sombras nítidas y no admite. pues, que la luz pueda bordear un obstáculo o cuerpo opaco. Por otro lado, según la teoría ondulatoria. un objeto suficientemente pequeño no producirá sombra alguna. Las limitaciones experimentales propias de la época no permitieron encontrar pruebas concluyentes a favor de la teoría ondulatoria. Los trabajos de Young y Fresnel, tiempo después, demostraron experimentalmente esto último, extrayendo, además, nuevas consecuencias teóricas para la teoría de la luz

ANEXO II

Tabla 1: valores sugeridos para una secuencia de trabajo de la experiencia del efecto fotoeléctrico, los resultados obtenidos y algunos comentarios a realizar.

Metal del electrodo=Cesio			
λ incidente (Å)	Potencial de frenado V_0 (V)	Intensidad	Observaciones e interpretaciones
5723 (Al)	1,50	1	El electrón no alcanza a llegar al electrodo opuesto. Los alumnos proponen disminuir el potencial de frenado V_0 .
5723 (Al)	0.28	1	A partir de este valor de V_0 , el electrón alcanza a llegar al electrodo opuesto. Se fija V en este valor. Se registra el valor los parámetros para los que se da esta situación. (aún no se ha discutido la relevancia de las diferentes variables involucradas). Si se varía la intensidad el potencial de frenado no cambia. Fijando el potencial de detención, si se aumenta la intensidad, se observa un aumento de la corriente en el amperímetro. Lo mismo sucede cuando disminuye la longitud de onda (por ej. a 3962 Å), manteniendo la intensidad constante. Nota: la corriente depende del número de electrones (vinculado a la intensidad) y su velocidad (vinculada a su energía cinética que puede modificarse través del potencial de retardo).
3962 (Al)	1.24	1	Se eligen otras longitudes de onda y se buscan los respectivos potenciales de detención. Se observa que al disminuir la longitud de onda aumenta la corriente en el amperímetro.
3083 (Al)	2.10	1	
6232 (Hg)	0.10	1	Se propone reemplazar la radiación incidente de Al por una lámpara de Hg y se registra nuevamente el potencial de detención
(7245 Ne)			Se propone utilizar como radiación incidente Neón. No se observa emisión. Se intenta entonces conseguir la emisión variando los valores de los otros parámetros posibles. Se disminuye el potencial hasta anularlo pero no se consigue la emisión para esta λ Se aumenta la intensidad de la radiación pero tampoco se consigue la emisión. La emisión no depende del potencial ni de la intensidad de la luz, sólo de λ .

Simple+mente física

Rafael Garcia Molina

Departamento de Física, Universidad de Murcia, Apartdo 4021, E-30080 Murcia, España
rgm@um.es

Qué es Simple+mente física

Desde el curso 2002-03 llevo proponiendo en los tablones de anuncios de algunas facultades de la Universidad de Murcia (principalmente las de disciplinas científicas y técnicas) las cuestiones de física que aparecen bajo el nombre genérico de *Simple+mente física*. Cada semana lectiva se presenta una cuestión nueva y, al mismo tiempo, se da la solución de la cuestión anterior.

La idea de proponer públicamente una cuestión semanal de física surgió para que las personas que la lean (alumnos principalmente, pero también profesores y otros estamentos universitarios) desarrollen la capacidad de recurrir a conceptos básicos de física para identificar, y posteriormente resolver, problemas que pueden acontecer en situaciones habituales o ficticias, pero fácilmente relacionables con la experiencia cotidiana.

Para que las personas que transitan por los pasillos de una facultad lean las cuestiones propuestas, he procurado que su presentación se ajuste a unos requisitos en cuanto a:

- *estética*: con imágenes y títulos sugerentes (la publicidad es eso, ¿no?), ya que en caso contrario los posibles lectores pasan de largo ante el gran número de hojas presentes en los tablones de anuncios;
- *redacción*: que ha de ser breve, clara y ambientada en situaciones fácilmente reconocibles por los lectores; además, conviene que la extensión de la respuesta no exceda de una página.
- *contenido*: que pueda analizarse y resolverse (o, al menos, comprender los argumentos utilizados para obtener la solución) empleando los conocimientos de física



general típicos de primer curso universitario o de los últimos cursos de la enseñanza secundaria.

La imagen que encabeza cada cuestión combina las palabras *Simple* y *mente* (la segunda siempre dentro de la cabeza de un personaje, dibujado por mis hijas o por mi), cuya unión mediante el símbolo “+” da pie a interpretar que las cuestiones de física que se plantean resultan ser “simples” con tal de que se mediten un poco (pudiendo, en muchos casos, resolverse sin más que realizar la experiencia sugerida). La procedencia de las cuestiones propuestas es variada, pues han surgido tanto de preguntas que yo mismo me he planteado al observar mi entorno, como de conversaciones con amigos y de lecturas de todo tipo (científicas o no); así es que en modo alguno las cuestiones de *Simple+mente física* pretenden ser originales, y una cuidada revisión bibliográfica pondrá de manifiesto que cuestiones similares han sido planteadas y/o resueltas en diversos lugares.

Con el paso del tiempo he tenido la satisfacción de constatar como, poco a poco pero de forma constante, ha ido aumentando el número de personas que se interesan por *Simple+mente física*, comentando entre ellas y conmigo las cuestiones y sus soluciones. De hecho, si alguna semana me he retrasado en dar la respuesta correspondiente y proponer una nueva cuestión, he recibido algún correo elec-

trónico, me han abordado por los pasillos de mi Facultad o he recibido alguna visita en mi despacho para comentar la cuestión. Merecen reseñarse las interesantes tertulias que, con motivo de alguna cuestión planteada en *Simple+mente física*, han surgido entre compañeros de departamento y amigos alrededor de un café o un refresco.

Dónde consultar las cuestiones

Para quienes no pueden consultar en los tablones de anuncios las cuestiones de *Simple+mente física* propuestas en su día, éstas también están disponibles en las dos páginas web siguientes:

- bohr.fcu.um.es/miembros/rgm/s+mf/

- www.fisimur.org/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=7

Para que los lectores puedan tomar contacto con el material, se han incluido algunas cuestiones en la sección MISCELÁNEA de este número.

Como resumen de todo lo dicho anteriormente, concluyo reproduciendo el párrafo que cierra la página en que aparece cada cuestión.

“El objeto de *Simple+mente física* no va más allá del placer que proporciona plantearse y resolver sencillas cuestiones razonando (y experimentando) de acuerdo con principios básicos de la física. No hay ningún tipo de compensación, excepto la satisfacción personal y no van dirigidas a ningún grupo de personas en particular (es decir, están abiertas a todo el mundo)”.